접힌 공진기 형태의 연속 발진 티타늄 사파이어 레이저의 발진 특성*

강영일 · 차용호 · 남창희
한국과학기술원 물리학과

(1995년 7월 19일 받음)

발진 파장 영역이 매우 광범위한 티타늄 사파이어를 사용하여 접힌 공진기 형태의 레이저를 제작하고 연속 발진 특성을 조사하였다. 티타늄 사파이어 결정은 Ti^{3+} 도핑율이 0.15 wt. %이고, 두께가 4.1 mm이며, 양면이 Brewster 각으로 되어 있는 것을 사용하였다. Brewster 면에서는 비점수차가 발생하므로, 이를 보정하기 위하여 공진기의 접힌 각도를 15.4°로 조정하였다. 펌핑 광원으로는 Ar-ion 레이저를 사용하였고, 반사율 90%의 출력경을 사용하여 2 W 펌핑에서 레이저 발진이 시작되었으며, 5 W 펌핑에서 450 mW 이상의 출력을 얻을 수 있었다. 또한 공진기의 두 오목거울 간의 거리에 따라 출력 변화를 조사하였다.

I. 서 론

티타늄 사파이어 이득 매질은 발진 가능한 파장 영역이 650~1100 nm로 매우 넓어서 파장 가변형 레이저에 많이 사용되어 왔다. 최근에는 Kerr 렌즈 모드록킹 등을 이용한 극초단 펄스 생성 연구가 활발하게 진행되면서 극초단 펄스 레이저의 이득 매질로도 각광 받고 있고[1-4], 우수한 열특성 때문에 고출력 레이저의 증폭 매질로도 사용되고 있다. 그러나, 티타늄 사파이어는 Nd:YAG 등의 다른 고체 레이저 이득 매질에 비해 형광 수명(fluorescent lifetime)이 3.2 μs로 비교적 짧아서 연속발진에 불리한 단점이 있다. 이러한 티타늄 사파이어나 색소 레이저와 같이 형광 수명이 짧은 이득 매질을 사용하여 연속 발진을 할 경우에는 이득 매질에 강한 집속 모드를 형성하고 집속 모드 영역에만 효율적으로 펌핑을 해야만 작은 펌핑 출력으로도 비교적 쉽게 레이저 발진이 가능하다. 또한 발진 파장 가변이나 모드록킹을 위해서는 공진기 길이를 충분히 확보하는 것이 유리하다. 이렇게 강한 집속 모드와 충분한 공진기 길이를 동시에 얻기 위해 공진기 내부에 오목 거울을 사용하는 특수한 형태의 접힌 공진기가 고안되었으며[5], 최근에는 Kerr 렌즈 모드록킹과 같이 매질의 비선형성을 이용하는 수동형 모드록킹에 이러한 접힌 형태의 공진기가 많이 사용되고 있다.

Kerr 렌즈 모드록킹 방법은 레이저 이득 매질의 비선형 굴절에 의한 자체 집속 효과를 이용하여 레이저의 세기에 따라 공진 모드의 변조를 유발시키고 조리개를 이용하여 강한 레이저의 모드만 발진시켜 극초단 펄스를 생성하는 방법이다. 이 방법은 매질의 비선형 굴절 효과를 크게하기 위해 매질을 통과하는 레이저의 세기를 강하게 해야 하므로, 매질내에서 공진 모드가 강하게 집속되는 접힌 공진기 형태를 사용하는 것이 유리하다. 한편 공진기내에서 집속되는 강한 레이저는 이득 매질의 표면을 손상시키기 쉬우므로, 대부분의 경우 표면을 코팅할 필요가 없는 Brewster cell 형태의 이득 매질을 사용한다. 이 때 Brewster cell에서는 비점수차가 발생하기 때문에 공진기의 접힌 각도를 조정하여 이를 보정해야 한다.

본 연구에서는 X자 형의 접힌 공진기 형태를 갖는 연속 발진 티타늄 사파이어 레이저를 제작하여 공진기 조건에 따른 출력 특성을 조사하였다. 이 때 티타늄 사파이어 결정은 양면의 입사각이 Brewster 각이 되도록 설치하였고, 접힌 공진기의 각도를 조정하여 비점 수차를 보정하였다.

II. 접힌 공진기의 해석

본 연구에서 제작한 접힌 공진기 형태의 티타늄 사파이어 레이저의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 공진기는 그림과 같이 두개의 평면거울과 두개의 오목거울을 사용하여 X자 형태로 제작되었으며, 두 오목거울 사이에 강한 집속 모드가 형성되도록 하였다. 이러한 접힌 공

*본 연구는 과학기술처의 출연기관연구개발 사업으로 수행되었음.

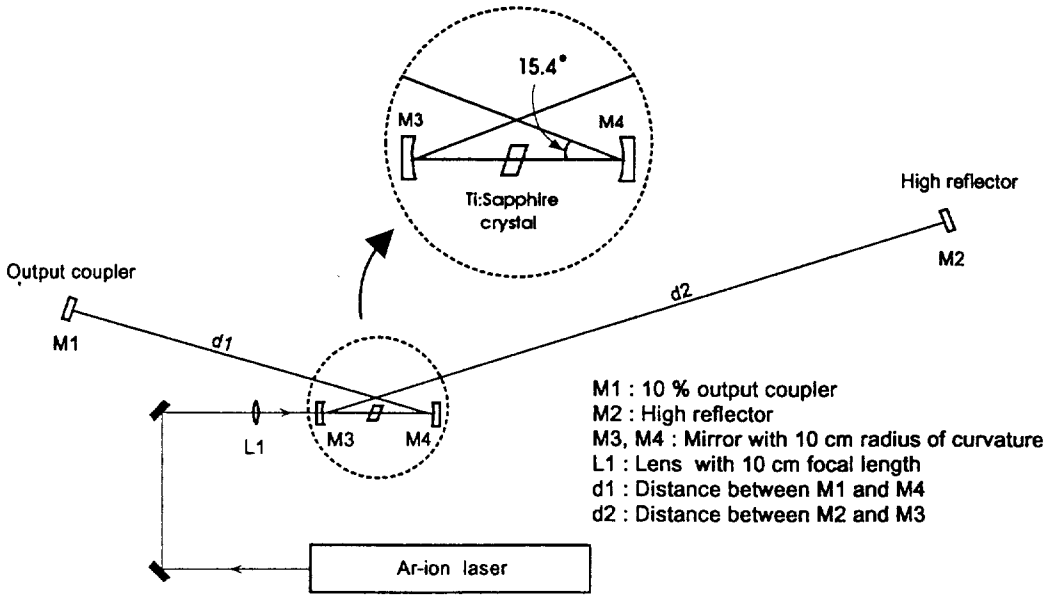

그림 1. Experimental setup of a Ti:sapphire laser in a folded geometry.

진기의 오목거울을 렌즈로 바꾸어 생각하면 그림 2와 같이 두개의 렌즈와 두개의 평면거울로 이루어진 공진기가 되므로, 이 공진기를 해석함으로써 접힌 공진기의 안정 조건을 조사할 수 있다[6].

그림 2에서 평면거울이 렌즈에 의해 맺히는 상을 생각하면 공진기는 다시 두 개의 오목거울로만 이루어진 더욱 간단한 등가 공진기로 해석될 수 있으며, 이 때 렌즈와 평면거울 사이의 거리를 각각 d_1, d_2, 렌즈의 초점거리를 f_1, f_2, 두 렌즈 사이의 거리를 $d_f=f_1+f_2+\delta$라고 정의하면 등가 공진기의 두 오목거울의 곡률반경 R_1, R_2는 각각 $R_1=f_1^2/(d_1-f_1)$, $R_2=f_2^2/(d_2-f_2)$가 되고, 두 오목거울 사이의 거리 L은 $L=R_1+R_2-\delta$로 표현된다. 여기서 R_1, R_2는 양의 값으로 정의 하였으며 δ는 미세 조정 거리이다. 이러한 두개의 오목거울로 이루어진 등가 공진기가 안정 조건을 만족하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0\le\left(1-\frac{L}{R_1}\right)\left(1-\frac{L}{R_2}\right)\le 1 \tag{1}$$

위의 (1) 식에 R_1, R_2 및 L을 대입하면 그림 2의 공진기는 δ가 다음 조건을 만족할 때 안정 조건을 만족한다.

$$0<\delta<R_2,\ R_1<R_1+R_2 \tag{2}$$

단, $R_2\le R_1$이라고 가정하였다. 위의 (2)식으로부터 두

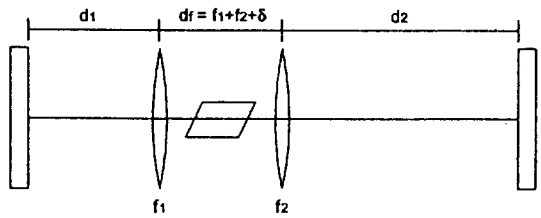

그림 2. Schematic diagram of an equivalent resonator with two lenses.

렌즈 사이의 거리(접힌 공진기의 경우는 두 오목거울 사이의 거리)를 변화시킴에 따라 공진기가 안정 조건을 만족하는 영역이 일반적으로 두 부분으로 분리되어 나타남을 알 수 있다.

한편, 그림 2에서 두 렌즈 사이에 생기는 집속 모드의 크기(접힌 공진기의 경우는 두 오목거울 사이에 생기는 집속 모드의 크기) W_0는 다음의 등가 공진기 집속 모드 크기와 같다.

$$W_0=\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2}\frac{[L(R_1-L)(R_2-L)(R_1+R_2-L)]^{1/4}}{|R_1+R_2-2L|^{1/2}} \tag{3}$$

여기서 λ는 레이저 파장이다. 위식에 $L=R_1+R_2-\delta$를 대입하면, W_0는 다음과 같이 미세 조정거리 δ의 함수로 표현된다.

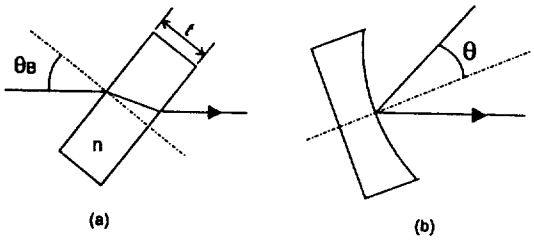

그림 3. Astigmatism in the folded cavity. (a) Brewster cell astigmatism, (b) mirror astigmatism (θ_B: Brewster angle, t: thickness of Brewster cell, n: refracrive index, θ: angle of incidence).

$$W_0=\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/2}\frac{[L(R_1+R_2-\delta)(R_1-\delta)(R_2-\delta)\delta]^{1/4}}{|R_1+R_2-2\delta|^{1/2}} \tag{4}$$

위 식에서 δ가 식 (2)의 조건을 만족할 경우에만, 즉, 공진기가 안정 조건을 만족할 경우에만 W_0가 유한한 실수 값을 가짐을 알 수 있다.

이상의 결과는 공진기 내에 이득 매질이 사용되지 않은 경우이며, 양면이 Brewster 각으로 연마된 Brewster cell 형태의 이득 매질을 사용할 경우에는 구결면(sagittal plane)과 자오면(tangential plane)에서 레이저 빔이 매질을 통과하는 광학적 길이가 달라지는 비점수차가 발생한다. 그림 3(a)와 같이 Brewster cell의 두께를 t, 굴절율을 n이라고 하고, 레이저 빔이 Brewster 각도로 입사하여 cell을 통과한다고 하면 구결면과 자오면에서 빔이 통과하는 유효거리 d_s, d_t는 각각 다음과 같다[5].

$$d_s=t\frac{\sqrt{n^2+1}}{n^2},\qquad d_t=t\frac{\sqrt{n^2+1}}{n^4} \tag{5}$$

또한 오목거울이 사용되는 접힌 공진기에서는 공진기 내의 레이저 빔이 그림 3(b)와 같이 특정한 입사각 θ로 오목거울에 입사해야 하므로, 이경우에도 구결면과 자오면에서 빔이 느끼는 오목거울의 초점거리가 서로 다르게 되는 비점 수차가 발생한다. 오목 거울의 초점거리를 f, 빔의 입사각을 θ라고 하면 구결면과 자오면에서의 초점거리 f_s, f_t는 각각 다음과 같다.

$$f_s=\frac{f}{\cos\theta},\qquad f_t=f\cos\theta \tag{6}$$

이와 같이 Brewster cell을 포함하는 접힌 공진기에서는 Brewster cell과 오목거울에서 각각 비점수차가 발생하게 된다. 그러나, 레이저 빔이 공진기를 한번 진행할 때, 오목거울에 두번 반사되고 Brewster cell을 한번 통과하게 되므로, 다음의 식을 만족하도록 공진기를 설계하면 두 수차를 서로 상쇄시킬 수 있다.

$$d_s-d_t=2(f_s-f_t) \tag{7}$$

식 (5), (6)의 결과를 위식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$t(n^2-1)\frac{\sqrt{n^2+1}}{n^4}=2f\sin\theta\tan\theta \tag{8}$$

위 식을 이용하여 오목거울에 빔이 입사하는 각도 θ, 즉, 공진기의 접힌 각도 2θ를 조정함으로써 접힌 공진기의 비점수차를 보정할 수 있다.

III. 티타늄 사파이어 레이저의 제작 및 연속 발진 특성

본 연구에서 사용한 티타늄 사파이어 결정(Union Carbide Co.)은 Ti^{3+}가 0.15 wt. %로 도핑되어 있고, 두께가 4.1 mm인 Brewster cell 형태이며, 인듐박막으로 감싼 후에 구리로 제작된 틀 안에 장착하여 열전도성이 좋도록 하였다. 그림 1의 접힌 공진기에 사용된 오목거울은 초점거리가 50 mm이므로 식 (8)에 의해 공진기의 접힌 각도는 15.4°로 조정하였다. 티타늄 사파이어의 펌핑 광원으로는 488~514 nm 영역에서 발진되는 모든 파장을 포함하여 최대 출력이 5 W인 Ar-ion 레이저(Coherent, Innova 90-5)를 사용하였다. Ar-ion 레이저에서는 S-편광의 레이저가 출력되므로 자오면에 수직한 Brewster 면을 갖는 티타늄 사파이어를 펌핑하기 위해서 3개의 거울을 사용하여 S-편광을 P-편광으로 바꾸어 펌핑하였다. 두개의 오목거울 사이에는 강한 집속 모드가 형성되고, 효율적인 펌핑을 하기 위해서는 Ar-ion 레이저 빔도 티타늄 사파이어 결정에 강하게 집속시켜야 하므로, 그림과 같이 초점거리 100 mm의 집속 렌즈를 사용하였다.

티타늄 사파이어는 이득 중심 파장이 800 nm 근처이고, 이득 선폭이 넓으므로, 평면거울 M2는 800 nm를 중심으로 넓은 선폭에 대해 전반사 코팅이 되어 있으며, 초점거리 50 mm의 오목거울 M3, M4는 800 nm 영역에서 전반사 코팅, 488~514 nm에서 무반사 코팅이 되어 있어서 티타늄 사파이어 레이저 빔은 반사하고, 펌핑광인 Ar-ion 레이저 빔은 투과하도록 하였다. 평면거울 M1은 출력경으로 800 nm 영역에서 90% 반사 코팅이 되어있다.

식 (2)에서 공진기가 안정 조건을 만족하는 δ의 범위는

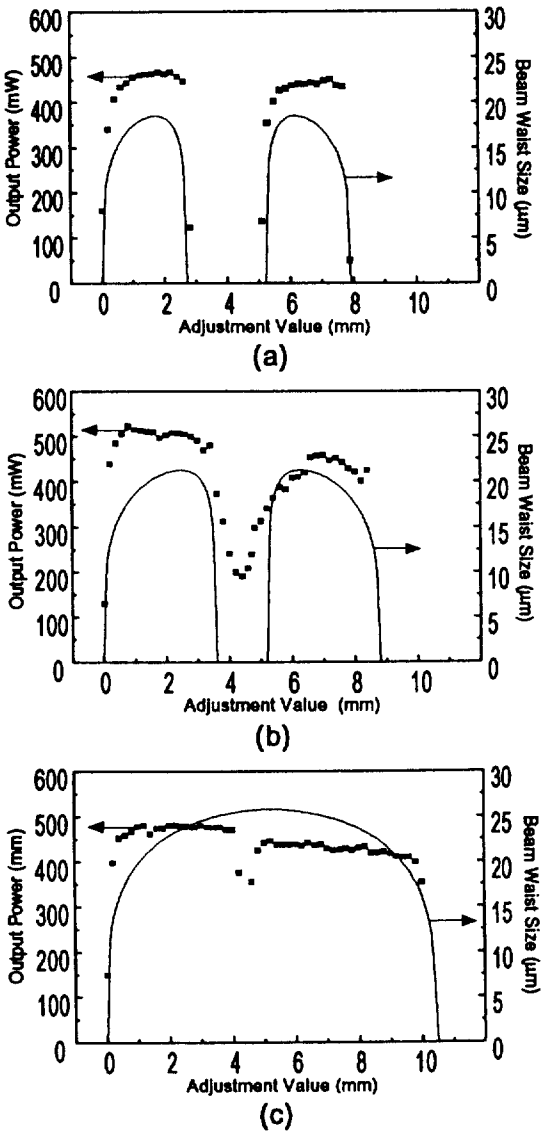

그림 4. Output power and beam waist size of Ti:sapphire laser with respect to the relative adjustment of distance between two curved mirrors. (a) d_1=530 mm, d_2=980 mm, (b) d_1=530 mm, d_2=750 mm, (c) d_1=d_2=530 mm.

수 mm의 좁은 영역이므로, 두 오목거울 사이의 거리가 mm 이하의 정밀도로 조정될 필요가 있다. 또한 티타늄 사파이어 결정은 두 오목거울 사이에 형성된 집속 모드에 놓여져야 하고, Ar-ion 레이저 빔은 티타늄 사파이어 결정에 집속되어야 하므로 티타늄 사파이어 결정과 집속 렌즈의 위치도 미세하게 조정될 수 있어야 한다. 이러한

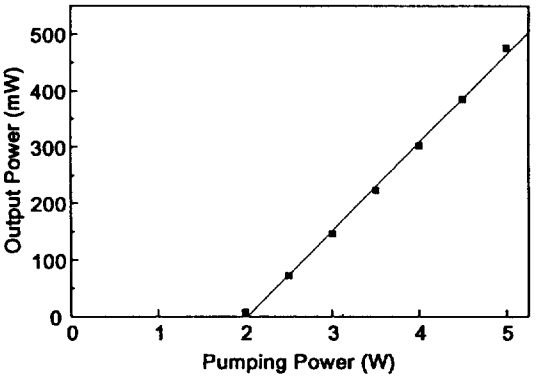

그림 5. Output power of Ti:sapphire laser with respect to Ar-ion laser pumping power.

목적을 위해 티타늄 사파이어 결정, 집속 렌즈 및 두 오목거울을 레일위에 설치하고, 마이크로미터 조정나사를 사용하여 각 부품의 위치를 정밀하게 조정할 수 있도록 하였다.

이상과 같이 티타늄 사파이어 레이저 공진기를 구성하고, 평면거울과 오목거울 사이의 거리 d_1, d_2를 변화시키면서 연속 발진 출력 특성을 조사하였다. 그림 4(a)는 d_1=530 mm, d_2=980 mm일 때, 두 오목거울 사이의 거리 변화에 따른 연속발진 출력을 나타낸 것이다. 그림에서 실선 그래프는 식 (4)를 이용하여 오목거울 사이의 거리 변화 δ에 따른 집속 모드의 크기를 나타낸 것으로, 이로부터 공진기의 안정 조건 영역을 알 수 있다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 안정 조건 영역은 두 부분으로 분리되어 나타나며, 이 영역에서만 레이저 발진이 가능하여 실험결과와 잘 일치하였다. 이 경우 5 W의 Ar-ion 레이저로 펌핑하였을 때, 티타늄 사파이어 최대 출력은 450 mW 이상이었다. 평면거울과 출력경의 위치를 조정하여 d_1=530 mm, d_2=750 mm로 하면, 분리된 두개의 안정 조건 영역이 서로 가까와지게 되며, 이 때의 연속 발진 출력을 오목거울 사이의 거리를 조정하면서 측정한 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. 실험 결과, 분리된 두 개의 안정 조건 영역의 사이는 공진기가 안정 조건을 만족하지 못하는 영역이나, 이 경우에는 실제로 출력이 약하지만 레이저 발진이 되는 모습을 볼 수 있다. 그림 4(c)는 d_1, d_2가 모두 530 mm일 때의 연속 발진 출력을 측정한 결과이다. 이 때는 대칭형 공진기로서 두 개로 분리되었던 안정 조건 영역이 하나로 합쳐지게 되며, 안정조건을 만족하는 영역도 넓어 진다. 실험 결과에서도 비교적 넓은 영역에서 균일하게 레이저가 발진 되는 모습을 볼 수 있다. 연속 발진 레이저를 구성할 경우에는 레이저

출력이 두 오목거울 사이의 거리 변화에 덜 민감한 것이 유리하므로, 그림 4(c)의 대칭형 공진기 경우와 같이 d_1, d_2 길이를 같게 하고, 전체적인 공진기 길이도 짧게하는 것이 좋다. 그러나, Kerr 렌즈 모드록킹을 할 경우에는 그림 4(a)의 비대칭형 공진기 경우와 같이 한쪽 길이를 길게하여 공진기 안정 조건 영역이 분리되도록 하고, 두 안정 조건 영역 사이의 경계 부근에서 모드록킹 시키는 것이 유리하다는 보고가 있으며[7-8], 전체적인 공진기 길이를 길게하는 것이 군속도 보상을 위한 프리즘 설치에도 유리하다. 그림 4(b)의 경우는 다른 경우에 비해 레이저 출력이 높게 나왔으며, 이로부터 공진기의 집속 모드와 펌핑 모드가 가장 잘 일치 된 경우임을 알 수 있다.

그림 5는 d_1=530 mm, d_2=980 mm일 때, 티타늄 사파이어 출력이 최대가 되도록 오목거울 사이의 거리를 조정한 후, 펌핑광원인 Ar-ion 레이저의 출력을 증가시키면서 연속 발진 티타늄 사파이어 레이저의 출력 특성을 조사한 것이다. 이 때 Ar-ion 레이저의 문턱 펌핑 출력은 약 2 W였으며, slope efficiency는 약 16%이고, 티타늄 사파이어 레이저의 최대 출력은 약 450 mW 였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 이득 선폭이 넓어 극초단 펄스 발생에 유리한 티타늄 사파이어 결정을 이득 매질로 사용하여 접힌 형태의 공진기를 제작하고, 연속 발진 특성을 조사하였다. 티타늄 사파이어 결정은 Ti^{3+}가 0.15 wt. %로 도핑된 것이며, 두께가 4.1 mm이고, 양면이 Brewster 각으로 되어있는 것을 사용하였다. 공진기는 이득 매질에 강한 집속 모드를 형성시키기 위하여 두개의 평면거울과 두개의 오목거울을 사용하는 접힌 공진기 형태로 제작하였으며, 접힌 각도는 15.4°로 조정하여 티타늄 사파이어 결정의 Brewster 면에서 발생하는 비점수차를 보정하였다. 티타늄 사파이어 펌핑 광원으로는 최대 출력이 5 W인 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 공진기의 집속 모드와 일치시켜 효율적인 펌핑이 되도록 집속 렌즈를 사용하였다. 접힌 형태의 공진기는 두 오목거울 사이의 거리에 따라 공진기의 안정 조건이 민감하게 변하므로, 오목거울과 집속 렌즈, 티타늄 사파이어 결정 등을 레일위에 설치하여 미세하게 위치를 조정할 수 있도록 하였다. 이렇게 공진기의 조건을 미세하게 조정하면서 티타늄 사파이어 레이저의 출력 변화를 관측하였으며, 이로부터 연속 발진 레이저의 경우에는 d_1, d_2의 길이가 같은 대칭형 공진기가 유리함을 알 수 있었다. 그러나, Kerr 렌즈 모드록킹을 할 경우에는 한쪽 길이를 길게 하는 것이 모드록킹과 군속도 보상용 프리즘 설치에 유리하다. Ar-ion 레이저 출력에 따른 티타늄 사파이어 레이저의 출력 변화를 조사한 결과, 출력경의 반사율이 90%였을 때, 문턱 펌핑 출력은 2 W 정도였으며, slope efficiency는 16%, 티타늄 사파이어 레이저의 최대 출력은 450 mW였다. 본 연구 결과는 Kerr 렌즈 모드록킹을 이용한 극초단 펄스 발생 연구에 응용될 것이다.

감사의 글

본 연구의 수행에 많은 조언과 도움을 주신 한국과학기술원 이상수 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] D. E. Spence, P. N. Keen, and W. Sibbet, Opt. Lett. **16**, 42(1991).

[2] G. P. A. Malcolm and A. I. Ferguson, Opt. Lett. **16**, 967 (1991).

[3] M. Asaki, C. P. Huang, D. Garvey, J. Zhou, H. C. Kapteyn, and M. M. Murnane, Opt. Lett. **15**, 977(1993).

[4] 차용호, 강영일, 남창희, "Kerr 렌즈 모드록킹된 Ti: sapphire 레이저에서 30 fs 이하의 극초단 펄스발생," 새물리(투고중).

[5] H. W. Kogelnik,, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, IEEE J. Quantum Electron. **QE-8**, 373 (1972).

[6] T. Brabec, Ch. Spielmann, P. F. Curley, and F. Krausz, Opt. Lett. **17**, 1292(1992).

[7] T. Brabec, P. F. Curley, C. Spielmann, E. Wintner, and A. J. Schmidt, J. Opt. Soc. Am. **B10**, 1029 (1993).

[8] G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni, and L. Pallaro, Opt. Lett. **19**, 807(1994).

Characteristics of a CW Ti:sapphire Laser in a Folded Geometry

Young Il Kang, Yong-Ho Cha, and Chang Hee Nam
Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: July 19, 1995)

We have studied the characteristics of a cw Ti:sapphire laser pumped by an Ar-ion laser. Ti:sapphire is one of the most attractive materials for the generation of ultra-short pulses because of its very broad gain bandwidth. We used a 4.1 mm thick, 0.15 wt. % Ti^{3+}-doped, Brewster-angled Ti:sapphire crystal and made a folded cavity to create a strong focusing mode. The folding angle of the cavity was adjusted to 15.4° to compensate for the astigmatism from the Brewster-angled Ti:sapphire crystal. 5 W Ar-ion laser was used as a pumping source. We observed that the Ti:sapphire cw output power was sensitively changed with respect to the condition of the folded cavity. The threshold pumping power was 2 W and the slope efficiency was 16% when an output coupler of 10% transmission was used. The maximum output power was more than 450 mW at 5 W pumping.